

氏 名	山田 耕二
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博乙第311号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	論文博士 (学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	鑄造欠陥を考慮したアルミニウム合金ダイカストの強度評価と予測に関する研究
論文審査委員 (主査)	尾田 十八 (自然科学研究科・教授)
論文審査委員 (副主査)	北川 和夫 (自然科学研究科・教授), 放生 明廣 (自然科学研究科・教授), 佐々木 敏彦 (教育学部・教授), 坂本 二郎 (自然科学研究科・助教授)

The strength estimation and prediction in consideration of casting defects of aluminum alloy die castings were studied. The main results are as follows : (1) The magnitude relationship of the size of the casting defect and its variation are evaluated by the extreme value probability distribution. It is effective method ; defects evaluation by the extreme value probability distribution in Quality control of aluminum alloy die casting parts. (2) The S-N curve and the damage mode from the ultrasonic fatigue test are almost the same as the results from the original Schenk fatigue test. Therefore, Using the fatigue strength evaluation based on the ultrasonic fatigue test is an effective method for quickly evaluating the super-long fatigue lifespan strength after  $10^7$  cycles for aluminum alloy die castings. (3) When surface defects were the crack starting points, the S-N curve leveled off around  $10^7$  cycles. On the other hand when the defects were internal defects, the S-N curve showed continued degradation as  $N_f$  increase. (4) When the crack starting point causes by an internal defect, ODA (Optically Dark Area) was observed around the crack initiation point over  $10^8$  cycles. However, ODA was not observed when compulsory fatigue was applied to a no-break sample that was tested over  $10^{10}$  cycles of  $N_f$ . It means there is a fatigue limitation caused from internal defect. Because it is supposed that the incidence of fatigue crack from the defect point or its progress were not recognized. (5) By using the following formula, which compares the relationship between  $\Delta K_{CD} \propto (\sqrt{area})^{1/3}$  and  $\Delta K_{th} \propto (\sqrt{area})^{1/3}$  based on the  $\sqrt{area}$  parameter model, it is possible to predict the breaking or non-breaking phenomenon caused by the casting defect in the super-long life area (over  $10^7$  cycles). (6) By using the above results, we were able to develop a high quality aluminum alloy die casting parts.

地球環境保護の観点から、自動車の燃費向上やCO<sub>2</sub>削減のために自動車部品の軽量化が望まれている。軽量化手段の一つとして量産性、コスト面に優れ、複雑形状に対応可能なアルミニウム合金ダイカストは自動車部品に数多く採用されている。オイルポンプケース、ロッカーカバーなどのケース・カバー類やシリンダブロックやトランスミッションケースなどのパワートレイン関連部品などであり、最近では、高い強度信頼性が要求される足回りやボディ関連部品などへの適用が進みつつある。これらアルミニウム合金ダイカスト部品の小型、軽量化および高い強度信頼性が必要な部品への適用拡大には、強度に影響を及ぼす鑄造欠陥を少なく、小さく制御する製造方法の改良とともに、製造方法に起因して内在している巣、湯境等の鑄造欠陥と強度特性の定量的把握が必要不可欠である。アルミニウム合金ダイカストの規格であるJIS H 5302 には静的強度特性が規格化されておらず、疲労

強度特性も日本機械学会発行の「金属材料疲労強度設計資料，Ⅰ」にADC12 材に関する 2 つの疲労強度特性データのみが記載されている状況である。このように標準強度を設定できない原因の一つとして製造方法に起因する鑄造欠陥により強度レベルが変わることが挙げられている。

また、一般にアルミニウム合金は疲労限度が存在せず、 $10^7$  回以降も疲労強度が低下すると言われている。自動車部品の長寿命化要求の高まりより、超長寿命域におけるアルミニウム合金ダイカストの疲労強度信頼性保証の必要性が増加することが予想される。高強度鋼やチタン材料では、 $10^7$  回以上の超長寿命域での内部破壊は表面破壊が生じる応力より低い応力で生じることが知られており、実部材の疲労強度評価の根幹に関わる現象となっている。アルミニウム合金ダイカストを長寿命が要求される自動車部品へ適用する際には  $10^7$  回以上の超長寿命域の疲労強度と超長寿命域の疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響を定量的に明らかにすることが重要である。

アルミニウム合金ダイカストの強度特性に関しては、機械的性質、破壊靱性値および疲労き裂進展特性についての研究が行われているものの、鑄造欠陥を考慮した強度特性に関する検討を行った報告は少ない。大量生産品である自動車部品へアルミニウム合金ダイカストを適用する場合には、強度下限値の評価が重要であり、そのためには鑄造欠陥の強度特性に及ぼす影響を定量的に評価可能な強度予測法の確立が必要である。

本研究では、鑄造欠陥と静的強度、疲労強度の定量的関係を明確にし、アルミニウム合金ダイカストの鑄造欠陥を考慮した強度予測法を確立することを目的とした。特に、強度設計の際、重要な疲労強度に関しては、 $10^7$  回時間強度と  $10^7$  回以上の超長寿命域の疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響を定量的に検討した。具体的には、 $10^7$  回時間強度に関しては各種アルミニウム合金ダイカストの  $10^7$  回時間強度とそのばらつきを日本機械学会基準の統計的疲労試験方法（小標本ステアケース法）に準拠した 14S-N 法にて評価するとともに、 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルとの関係を定量的に検討した。その際、アルミニウム合金ダイカストの部品管理において極値統計分布による鑄造欠陥評価が有効かどうかについても検討した。次に、 $10^7$  回以上の超長寿命疲労強度に関して、周波数 50Hz の従来のシェンク形疲労試験機と 20KHz の超音波疲労試験機により評価して、S-N 曲線・破損モードなどを比較し、超音波疲労試験機を加速評価として用いる際の有効性と留意点について検討した。そして、 $10^{10}$  回までの S-N 曲線や破面および鑄造欠陥寸法などから、鑄造欠陥を疲労き裂発生起点とするアルミニウム合金ダイカストの疲労強度予測法について検討した。その際、超長寿命領域における内部欠陥起点型の疲労強度と表面欠陥起点型の疲労強度を比較検討し、疲労強度予測法に反映した。また、表面欠陥起点型および内部欠陥起点型の破壊起点部周辺の破面を詳細に観察、比較するとともにそれらの破面近傍の縦断面観察を実施して、アルミニウム合金ダイカストの内部欠陥起点型の疲労破壊機構について検討した。最後に、得られた鑄造欠陥を考慮した強度予測法を実機のアルミニウム合金ダイカスト部品開発に適用した。

得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 4 種類のアルミニウム合金ダイカストの疲労強度特性を 14S-N 法により明らかにするとともに、 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルを用いて鑄造欠陥と  $10^7$  回時間強度の定量的関係について検討を加えた。亜共晶 Al-Mn 合金 ADC24Z 材と Al-Si-Mg 合金 AC4C 材は試験片表面の基底組織

を疲労き裂発生起点としていた。共晶Al-Si-Cu合金ADC10材、D10FM材およびADC12材の疲労き裂は製造方法に起因した巣、湯境をき裂発生起点としていた。そして、疲労き裂発生起点部付近から得られる各種鑄造欠陥面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ を極値確率紙にプロットした結果より、極値確率分布による鑄造欠陥の寸法やばらつきの大小関係は14S-N法により得られた各種試験片の変動係数の大小関係とよく一致することを見出した。アルミニウム合金ダイカスト部品の品質管理において重要な各種欠陥の管理を極値統計による欠陥の評価により行うことの有効性を明らかにした。さらに、極値統計分布より得られる疲労試験片14本中に存在することが予想される最大鑄造欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ 、基地組織のビッカース硬さHVを用いて $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルより推定した疲労限度 $\sigma_{\text{WL}}$  (N=14)と14S-N法により得られた $10^7$ 回時間強度の平均値 $\sigma_{\text{W}}(\bar{x})$ との差は約15%程度以内であることも明らかにした。また、14S-N法によって得られる $10^7$ 回時間強度下限値 $\sigma_{\text{W}}(\bar{x}-3\sigma)$ と $\sqrt{\text{area}}$ パラメータ法によって推定される疲労限度の相関関係も見出した。

(2)  $10^9$ 回までの超長寿命域の疲労強度を従来のシェンク形疲労試験機（周波数50Hz）にて評価した。Al-Si-Mg合金AC4C-T6材の疲労き裂発生起点はすべて試験片表面付近の基地組織である。 $10^7 \sim 10^9$ 回の超長寿命域において、疲労強度は低下し、 $10^9$ 回時間強度は $10^7$ 回時間強度の約70%となった。一方、ADC10-T5材の疲労き裂発生起点はすべて試験片表面付近の鑄造欠陥である。 $10^7 \sim 10^9$ 回の超長寿命域において、疲労強度の低下は認められず、明確な疲労限度が現れているかのような挙動を示すことを明らかにした。

(3) 超長寿命疲労強度評価を効率的に行う手法として、周波数20kHzの超音波疲労試験機で実施する際の実験条件について検討した。AC4C-T6材では発熱対策が必要であり、空気による強制冷却と適正な断続運転条件を併用することで試験片の発熱を室温程度に抑制することが可能であることおよびADC10-T5材では発熱現象がほとんど生じないということを経験片の表面温度を放射温度計により実測することにより明らかとした。さらに、試験片の発熱は試験周波数の低下をもたらすことに着目し、共振周波数をモニターすることによって、供試材の材質や応力レベルが異なる場合においても試験片表面の温度測定を実施することなく適正な断続運転条件の決定が可能であることがわかった。

(4)  $10^7$ 回以上の超長寿命疲労強度に関して、50Hzの従来のシェンク形疲労試験機と20KHzの超音波疲労試験機により評価して、S-N曲線・破損モードなどを比較し、超音波疲労試験機をアルミニウム合金ダイカストの加速評価として用いる際の有効性と留意点について検討した。その結果、鑄造欠陥を疲労き裂発生起点とする共晶Al-Si-Cu合金ADC10-T5材や表面の基地組織を疲労き裂発生起点とする亜共晶Al-Si-Mg合金AC4C-T6材の超音波疲労試験によるS-N曲線と破損モードはシェンク形疲労試験によるS-N曲線や破損モードと大差なく、超音波疲労試験は $10^7$ 回以上の超長寿命疲労強度を短時間に評価できる有効な手法であることが明らかになった。

(5) 内部および表面の鑄造欠陥を疲労き裂発生起点とするADC10-T5材やD10FM-T6材の超長寿命疲労強度特性を超音波疲労試験により評価した。その結果、両者のS-N曲線は異なり、内部欠陥起点型の疲労寿命の方が表面欠陥起点型の疲労寿命に比べ長寿命側である。そして、表面欠陥起点型のS-N曲線は $10^7$ 回付近で折れ曲がり $10^{10}$ 回まで水平な挙動を示すのに対し、内部欠陥起点型のS-N曲線は破損繰返し数の増加に伴い低下する挙動を示し、 $10^7$ 回以上の超長寿命域で内部欠陥起点型破壊は表面欠陥起点型破壊が生じる応力より低い応力で

生じることが明らかになった。また、表面欠陥起点型の疲労き裂発生起点である表面近傍の巣欠陥周りの破面は破損繰返し数の違いにより、顕著な違いが認められないのに対し、内部欠陥起点型の場合、 $N_f > 1 \times 10^8$  回にて疲労き裂発生起点の鑄造欠陥周りに高強度鋼の内部破壊と同様な組織より微細な凹凸模様の破面領域（ODAと記す）が認められた。 $N_f > 10^{10}$  回の内部欠陥起点型の未破損試験片を強制的に疲労破壊させた破面にはODAは認められない。このことは、巣欠陥から疲労き裂の発生もしくは進展が無かったことを意味しており、内部起点に対する疲労限度の存在を示唆しているものと考えられる。

(6) 表面欠陥起点型および内部欠陥起点型とも  $\sqrt{area}$  パラメータモデルによる  $\sigma_a / \sigma_w N_f$  曲線により、狭いバンドで表現でき、鑄造欠陥を起点とする  $10^7$  回以上の超長寿命域の破損／未破損の境界を定量的に評価可能である。しかし、その境界の  $\sigma_a / \sigma_w$  は 1.0 より小さく、表面欠陥起点型の場合は  $\sigma_a / \sigma_w$  が約 0.7 付近、内部欠陥起点型の場合は  $\sigma_a / \sigma_w$  が約 0.5 付近となり、 $\sigma_w$  の予測は危険側となることが明らかとなった。

(7) 表面欠陥起点型および内部欠陥起点型の  $10^7$  回以上の破損／未破損試験片の疲労き裂発生起点の鑄造欠陥寸法  $\sqrt{area}$  と振幅応力  $\sigma_a$  から得られる応力拡大係数範囲  $\Delta K_{CD}$  は一定値ではなく、 $\Delta K_{CD} \propto (\sqrt{area})^{1/3}$  の関係がある。そして、 $10^7$  回以上の破損／未破損試験片の  $\Delta K_{CD} \propto (\sqrt{area})^{1/3}$  と  $\sqrt{area}$  パラメータモデルでの  $\Delta K_{th} \propto (\sqrt{area})^{1/3}$  関係を比較して補正することにより、 $\sigma_a / \sigma_w' = 1.0$  で破損／未破損の境界を定量的に予測できることが明らかになった。なお、内部欠陥起点型の場合は疲労き裂発生起点の鑄造欠陥とODAの境界が不明確なことから、鑄造欠陥とODAの合計面積の平方根を  $\sqrt{area}$  に代入した。

(8) アルミニウム合金ダイカストの内部欠陥起点型の特徴であるODAは、破損繰返し数  $N_f$  が  $10^8$  回以上の試験片全てに顕著に認められた。また、表面欠陥起点型の破壊起点部周辺の縦断面の組織は表面近傍と内部で顕著な違いは認められないのに対し、内部欠陥起点型の縦断面にはナノ結晶の微細組織が認められた。破壊起点部において、約  $5 \mu m$  ～ 約  $10 \mu m$  厚さで粒径  $200 nm$  ～  $400 nm$  のナノ結晶の微細組織が認められた。ナノ結晶は微細な凹凸模様の破面を呈する破壊起点部に限定されず、起点部周辺の平坦な破面の縦断面部においても表面から約  $1 \mu m$  が部分的にナノ結晶の微細組織が認められた。これらの微細組織と基地組織の境界は明瞭に識別できる特徴がある。この特徴は強加工によるナノ結晶組織と共通している。これらのことより、ODA（ナノ結晶の微細組織）の形成は、破面の凹凸の繰返し接触により、加工分野における繰返し強加工と類似した機構で破面近傍にナノ結晶の微細組織が形成されたものと推察される。以上の破面観察と断面観察結果より、内部欠陥起点型の疲労破壊過程は以下のように考えられる。

- 1) 巣などの鑄造欠陥からの疲労き裂の発生・進展
- 2) 応力振幅の長期の繰返し負荷中で破面同士が繰返し接触
- 3) ODA（ナノ結晶化）の発生
- 4) 巣欠陥とODAを含む領域が、応力との関係において寸法に依存する限界値まで成長し、通常の疲労き裂が発生
- 5) 通常き裂が限界値まで進展し、試験片が破断。

破断までの間で破面間の接触により、ナノ結晶化が生じる。

(10) 得られた鑄造欠陥を考慮した強度予測法を高品質・高信頼性・低コストを必要とするアルミニウム合金ダイカスト部品開発へ反映した。実機のアリミニウム合金ダイカスト部

品開発への適用として、構造設計より、強度保証部に求められている要求強度に対する欠陥寸法（許容欠陥寸法）を強度予測法により求める。次に、求めた許容欠陥寸法以下になるようにアルミニウム合金ダイカストの製造方法の開発を行うとともに、欠陥寸法を検査する方法を決定した。その後、実部品の強度確認を行い、生産準備・生産に取り組み、大量生産を実現した。

## 学位論文審査結果の要旨

平成 18 年 12 月 25 日の第 1 回学位論文審査委員会、および平成 19 年 1 月 30 日の口頭発表と第 2 回学位論文審査委員会において審査した結果、以下の通り判定した。

本研究は、量産性、コスト面に優れ、複雑形状に対応可能であることから、近年自動車部品を中心として広範囲な分野へ利用されつつあるアルミニウム合金ダイカストの強度評価と予測法を明らかにしたものである。特に強度設計上重要な疲労強度について、 $10^7$  回時間強度と  $10^7$  回以上の超長寿命域の疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響を実験を通して定量的に明らかにし、その予測法を提案している。

具体的には  $10^7$  回時間強度に関しては、各種アルミニウム合金ダイカストのそれらの値を  $14S-N$  法で評価し、鑄造欠陥寸法の  $\sqrt{area}$  パラメータモデルとの相関性を明らかにしている。一方  $10^7$  回以上の超長寿命疲労強度に関しては、 $\sqrt{area}$  と応力振幅から得られる応力拡大係数範囲との関係を用いて、それらを定量的に予測できることを明らかにした。これらの結果を利用して、アルミニウム合金ダイカストの作用応力下の許容欠陥寸法の決定法を明らかにした。そのことが設計面、製造面で高精度な強度保証をしたアルミニウム合金ダイカスト部品の大量生産への道を拓くという実用的技術開発へ大きく貢献している。よって本論文は博士（工学）に値するものと判定する。